

SOFC本格普及への開発課題と評価・解析技術の進展

第14回FC-Cubicオープンシンポジウム (2024年8月2日)

関係者一覧

(委託先)国立研究開発法人産業技術総合研究所、一般財団法人電力中央研究所、
国立大学法人東京大学、国立大学法人京都大学、国立大学法人九州大学、国立大学法人東北大学、
イムラ・ジャパン株式会社、(共同実施)大阪ガスマーケティング株式会社、(協力機関)京セラ株式会
社、森村SOFCテクノロジー株式会社、株式会社デンソー、東京瓦斯株式会社、東邦ガス株式会社、
日産自動車株式会社、(再委託先) 千葉工業大学、慶應義塾大学

発表者： 堀田 照久

国立研究開発法人産業技術総合研究所

省エネルギー研究部門 研究部門長

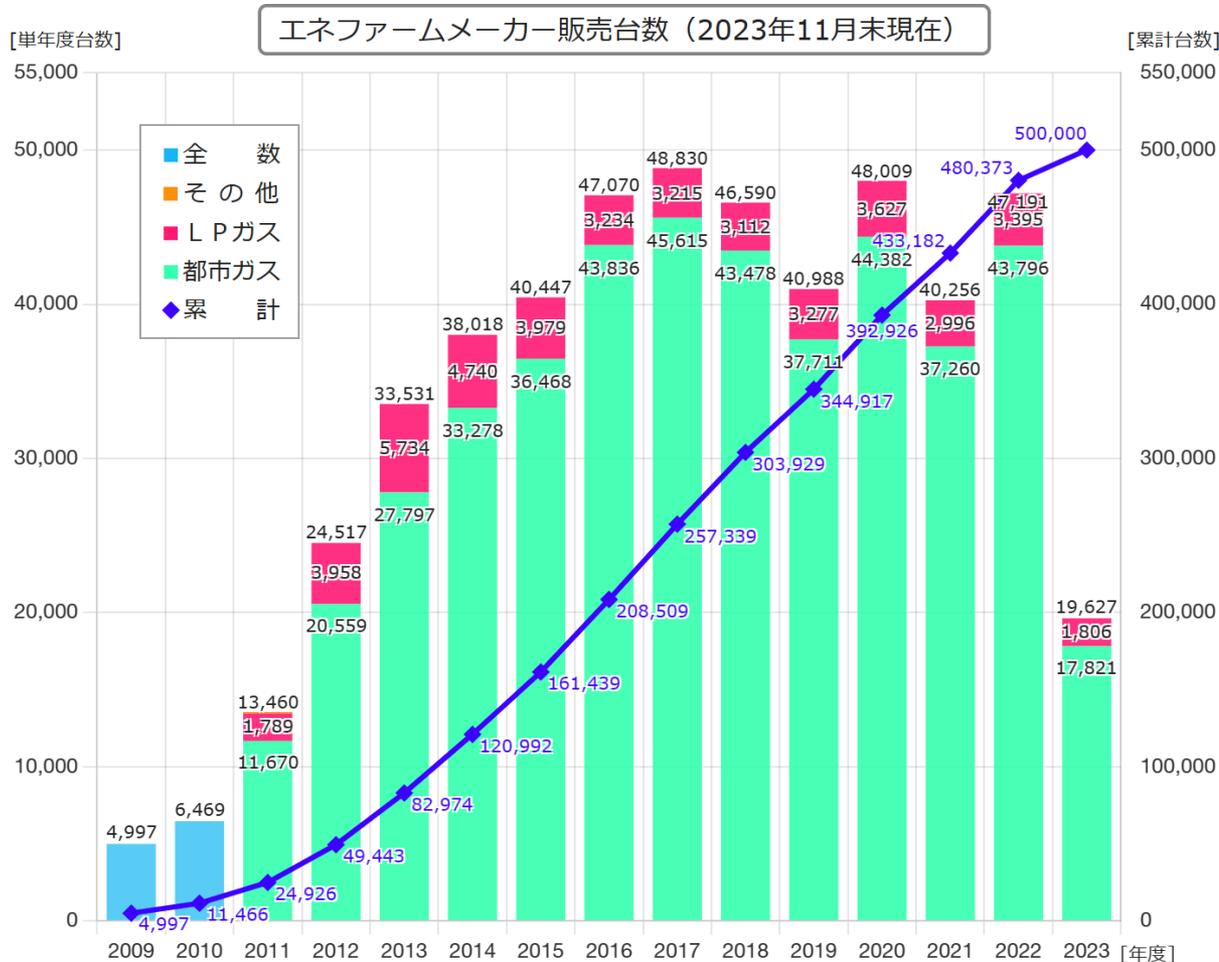
目次

- 1. 序論：定置用燃料電池の普及とSOFC**
- 2. SOFCの実用化と産学官連携プロジェクトの経緯**
- 3. 評価・解析プロジェクトの成果概要(2020-02024年度)**
- 4. 今後の展開**
- 5. まとめ**

1. 序論

家庭用燃料電池（エネファーム）の普及

- ◆累計50万台余り(2023年11月)。年産4万台以上
- ◆このうち、最近のType-Sは年産2万台以上(半数超)、300億円市場
- ◆政府目標300万台@2030年に向けて、コンパクト化・高性能化も検討



コージェネ財団HPより

1. 序論

世界での燃料電池普及状況：タイプ別

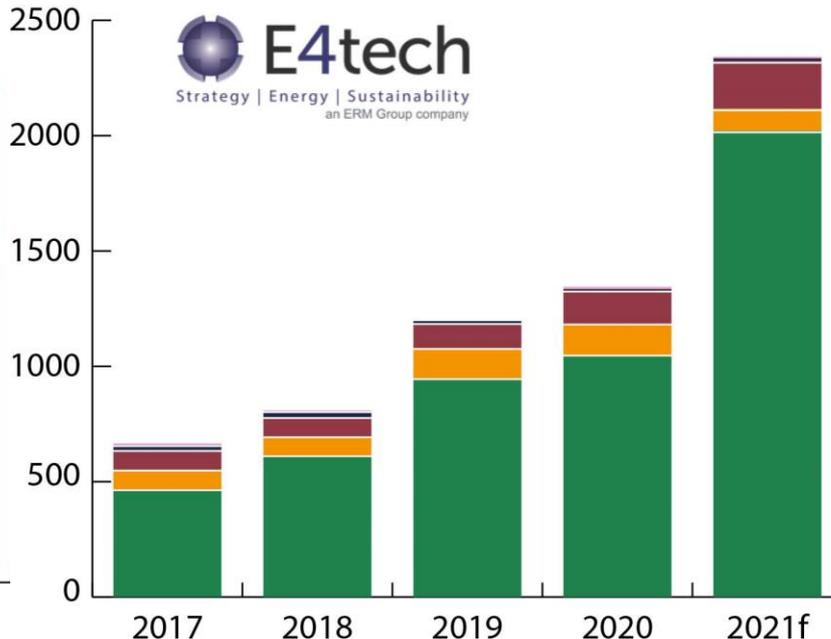
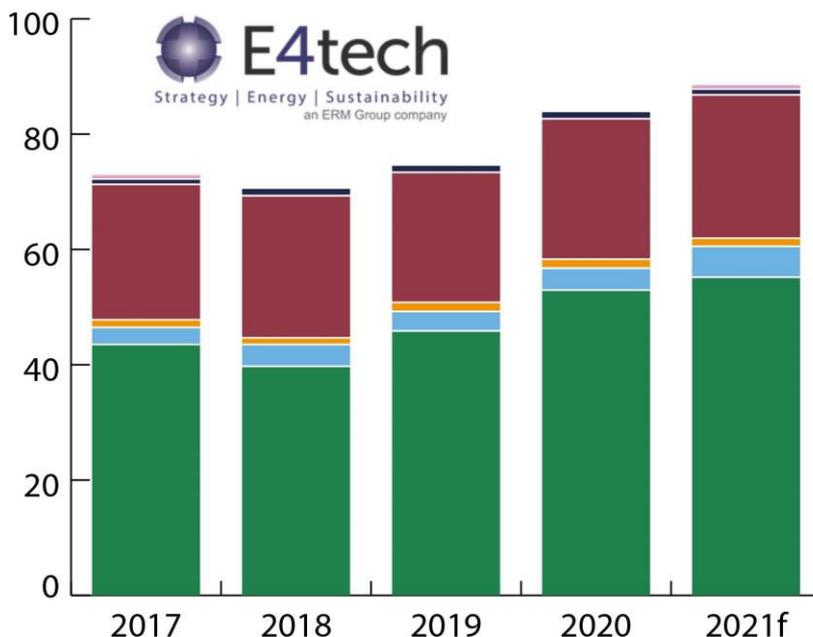
- ◆最近の生産数 8万台/年超。エネファームはこの中に含まれる(SOの2万台超も)
- ◆出力で2400MW/年。大部分はPEM燃料電池に:FCV及び定置用の寄与
- ◆SOFCは約100MW。15MW弱はエネファームType-S

10万台

2500MW

Shipments by fuel cell type 2017 - 2021 (1,000 units)

Megawatts by fuel cell type 2017 - 2021



- ・全体で8万台あまり(日本のエネファーム4万台はこの中にカウント、SOとOEMFCに)
- ・FCVの割合は年産3万台以上か

- ・SOFC: 100MW弱
- ・エネファーム4.5万台/年は~30MW/年の寄与
Bloom Energyがかなりの割合を占める

1. 序論

定置用燃料電池 エネファームType-S

- ◆ 累積50万台以上、このうちType-Sは15万台以上(推計)
- ◆ システム価格150万円(本体100万円以下、バックアップボイラ等含)

PEFC-type

Release from May 2009



From: Panasonic HP

<https://panasonic.biz/appliance/FC/>

Temperature: 80-90°C
Efficiency: above 45%(LHV)
(Thermal Eff. 56%)
Power output: 700W
Thermal output: 1.1kW

SOFC-type

Release from October 2011

Release from 2019
Ene-farm mini



From: Osaka Gas HP
(Aisin Corporation)

Temperature: Above 700°C
Efficiency: 46.5%(2012)
(Thermal Eff.:45%)
Power output: 700W
Recent new version:
LHV52% (2016)->55%(2020)

From: Tokyo Gas HP
(Kyocera Corporation)

Temperature: Above 700°C
Power output: 400W
Electric Efficiency: 47%(LHV)
Recent new version(2022):
Electric Efficiency: 50%(LHV)
Thermal Efficiency:35%LHV

1. 序論

定置用燃料電池 業務用

- ◆京セラ3kWシステムは、50台以上をファミレスなどに導入
- ◆三浦製4.2kW機はCeres Power社のセルスタックを搭載

京セラ
3kW機



Power generation unit

Specifications

Rated Output of Power Generation (AC)	3kW
Rated Power Generation Efficiency	52.0% (LHV, default)
Rated Overall Efficiency	90% (LHV, default)
Dimensions	1,150 W × 675 D × 1,690 H (mm)
Weight	375 kg
Gas type	City gas (13A)

* A hot water storage unit (200L) separately sold by Noritz Corporation is also required.

京セラHPより(2017)

三浦工業
4.2kW機



燃料	都市ガス 13A
定格発電量(kW-AC)	4.2
熱回収量(kW)	3.4
発電効率(%-LHV)	50
総合効率(%-LHV)	90
製品寸法(mm)	1,500(W) × 690(D) × 1,820(H)
質量(kg)	840

Data from:

<https://www.miuraz.co.jp/product/thermoelectric/sofc.html>

1. 序論 定置用燃料電池 産業用250kW

- ◆ 産業用燃料電池は高圧システムでガスタービンとのハイブリッド：250 kW
- ◆ 東京駅近くの三菱地所に2018年初めて商品として納入
- ◆ 日本特殊陶業と三菱重工との合弁会社 CESYLLSを2020年に作りOEM生産

<https://power.mhi.com/jp/news/20200204.html>

250 kW system

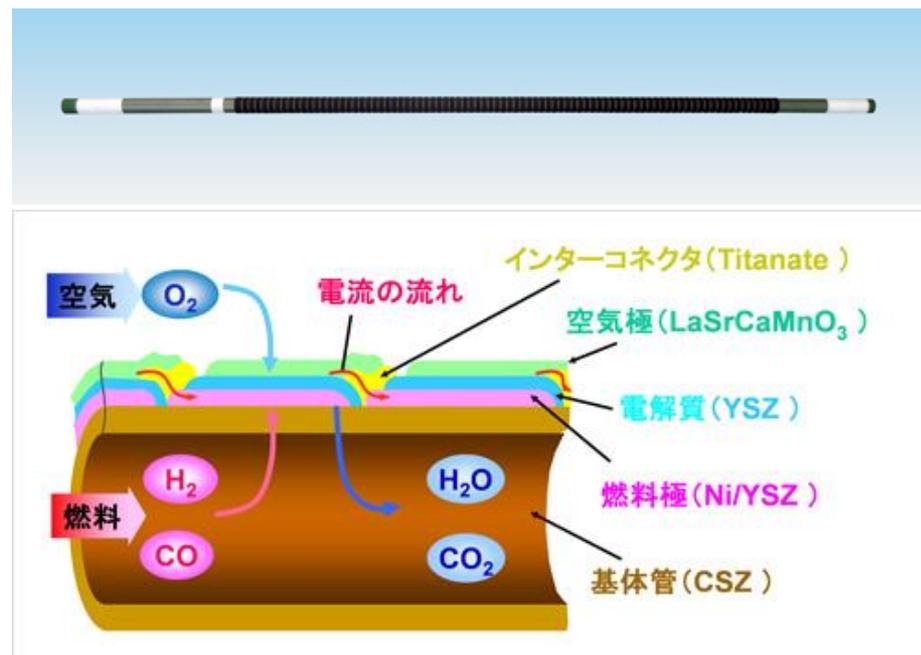
三菱重工製の外観(三菱重工HPより)



実証機として導入:

Kyushu University (2016)

Toyota, NGK-Sparkplug, J-Power, Taisei (2016)



Data from: <https://www.mhps.com/jp/products/sofc/>

1. 序論

定置用燃料電池 産業用一燃料多様化への展開

- ◆ トランジェントで重要役割：燃料多様化、バイオガスや石炭ガス化ガスへ適用
- ◆ CO₂を回収し有効利用するトータルシステム構築に寄与

アサヒ でのビール工場設置(2020) バイオガス(CH₄+CO₂)の利用



250 kW high pressure + gas turbine
Hybrid system

アサヒHPより

大崎クールジェンPJ

IGFCでのクリーンアップガスの導入 + CCSで、低炭素発電実現（2022年実証運転）



1.2MW high pressure + gas turbine
Hybrid system

Operation started on April 18, 2022

NEDO release

https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101534.html

1. 序論

世界での定置用燃料電池 業務・産業用中心

- ◆ Bloom Energyが定置用市場の大部分(基本単位は240kW、韓国で8MW導入)
- ◆ BOSCHは2024年の市場投入予定。Ceresとの提携で4.5kWシステム構築
- ◆ sunfireはSOEC技術でリード、実証、市場導入を進める(すでにMW級電解システム構築)

Bloom Energy



<http://www.bloomenergy.co.jp/>

Ceres Power



After Ceres Power HP

BOSCH



After BOSCH HP

●すべてのSOFC企業が水素製造システム(電解SOECや共電解)への展開へ

sunfire



After Sunfire HP

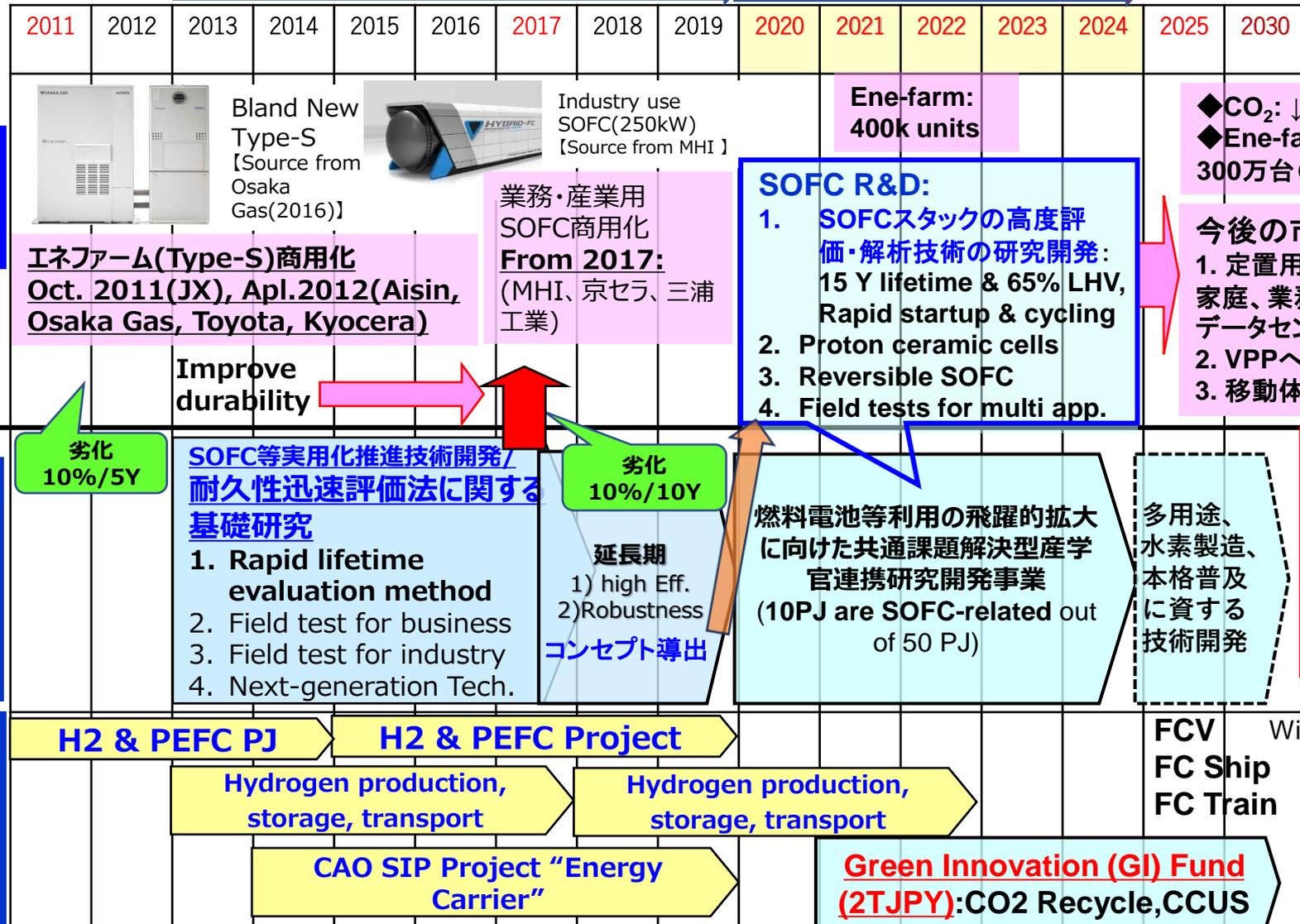
目次

1. 序論：定置用燃料電池の普及とSOFC
- 2. SOFCの実用化と産学官連携プロジェクトの経緯**
3. 評価・解析プロジェクトの成果概要(2020-02024年度)
4. 今後の展開
5. まとめ

2. SOFC実用化：国プロとSOFCの商用化 SOFC関連NEDOプロジェクトおよび市場導入について

前プロジェクト

現プロジェクト



2. 産学官連携プロジェクト（耐久性PJ）

耐久性迅速評価方法に関する基礎研究の目的及び目標 (2013～2017年度、2018-2019年度)

「固体酸化物形燃料電池等実用化推進技術開発」

「固体酸化物形燃料電池の耐久性迅速評価方法に関する基礎研究」(平成30-31年度)

目的

高効率で運用性の高い強靱な燃料電池システムを実現するための高効率・強靱化SOFCセルスタック開発への課題抽出や設計指針を出す。

(より詳細で具体的な取り組み)

LHV65%以上の業務用SOFCシステム開発コンセプト創出に向けて、高効率セルスタックを実現する企業の技術開発を推進するため、基盤機関の高度な耐久性、高効率・強靱化迅速評価法を駆使して高燃料利用率下や負荷変動時のセルスタックの課題抽出と対策提案をおこなう。

目標

「スタック耐久性評価」「劣化機構解明」「耐久性評価方法の開発」の成果を統合し、高効率化・負荷変動運転における材料・部材の劣化の進展と性能低下を相関付け、課題を抽出し、改良に必要な情報を提供するとともに劣化防止法のコンセプトを導出する。

2. 産学官連携プロジェクト(耐久性PJ)

SOFC高効率化への取り組み：考え方

目標:

SOFCシステムの発電効率を最大限にし、その適用性を拡大するための基盤技術を開発するとともに高効率化への指針を示す。そのため、セルスタックにおける最大効率運転時の課題抽出と対策を示す。

$$\text{発電効率 } \eta = -nF/\Delta H \times V \times Uf \times \eta_{AUX} \times \eta_{inv}$$

n : 反応電子数、 F :ファラデー定数、 ΔH : 使用燃料の発熱量、

V : SOFCの作動電圧、 Uf : 燃料利用率、 η_{AUX} : 補器の効率、 η_{inv} : インバータ効率

考え方(例示):

耐久性9万時間の見通しを持ちつつ、適正な電流密度(コスト)で、かつ発電効率 LHV65%達成のためには、スタックで:

作動電圧 $E=0.8V\sim 0.85V$ 以上

燃料利用率: 75%→ 85%以上程度にする必要がある。

各社のセルスタックは、形状が異なり、高効率化への対応が異なるが、ワンパスで達成できる最高燃料利用率・最高効率時に起こりうる課題を明確化し、その対策を提示する。抽出される共通基盤的な課題、解決法などを示し、次世代SOFCのための指針を示す: $Uf=80\%, 85\%$ などを基準として、起こりうる課題を抽出する。

2. 産学官連携プロジェクト(耐久性PJ)

強靱化への取り組み：考え方

目標：

再生可能エネルギーが大量導入された時に、電力負荷変動を吸収し、電力グリッドの安定化に資する業務用SOFCシステム(数kW-数10kW)のための基盤技術を開発する。高効率運転で負荷変動した時の課題を抽出し、対策を提示する。

考え方：

1. 負荷変動対応の例（電中研からの試験プロトコルを参照）：

太陽光発電や風力発電の変動をどのレベルで考慮するかは、調査研究の結果や今後の議論で決定する。まず手始めとして、消費者に近い低圧(200V)の配電網での変動吸収を考慮すると仮定する(蓄電池やDC-ACインバータ、そのほかの付属電気システムの性能も後日議論する)。

下記の燃料電池の負荷変動を設定する(例)：

変化振幅：3W/s程度の変化（各スタックの出力や性能に応じて決定）

変化周期：火力の瞬動予備力を仮定した際の負荷変動を想定(1s以下での変化)

波形：三角波での変化

2. 起動停止：

従来型の燃料極支持形SOFCセルスタックでは、当座取り組まないが、金属支持型との比較のために、単セルなどで検討予定

2. 産学官PJ : SOFC開発課題

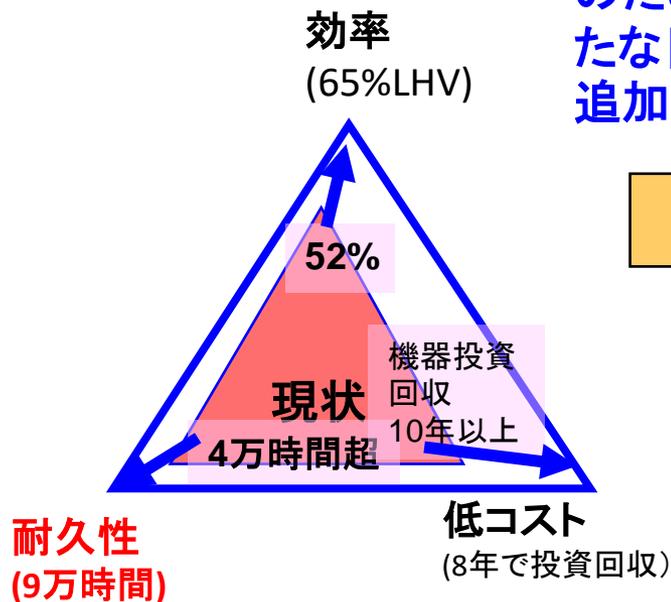
2018-2019 : 適用性拡大への課題抽出・コンセプト創出へ
再エネ大量導入のための高効率・強靱化燃料電池への新たな目標
(より高次元の目標に対する課題抽出・コンセプト創出)

耐久性迅速評価とその成果

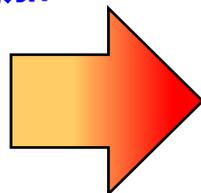
静的な条件での技術目標

(2013-2017年)

(赤字:NEDOプロジェクト目標)



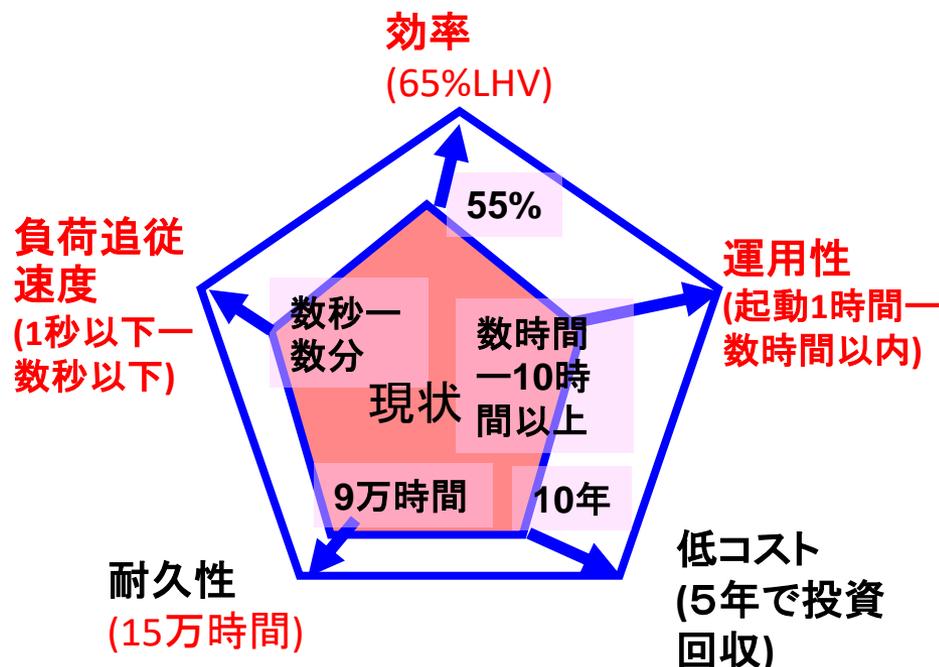
適用性拡大
のための新
たな目標が
追加



高効率セルスタック実現のための

動的な技術目標を追加 (赤字:国プロ)

(2018-2019年) (2020~)

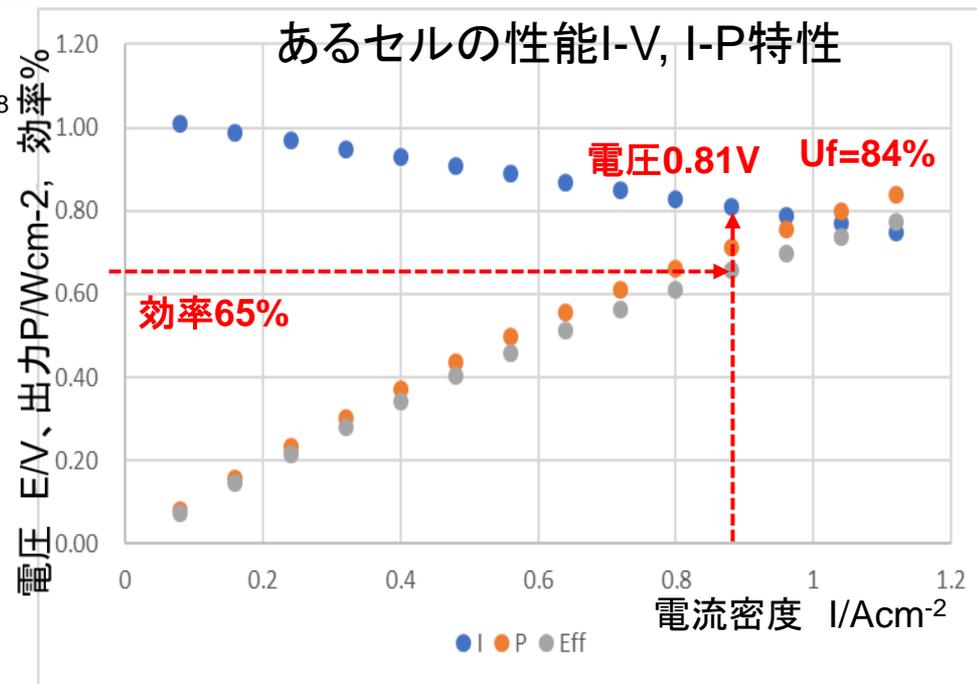
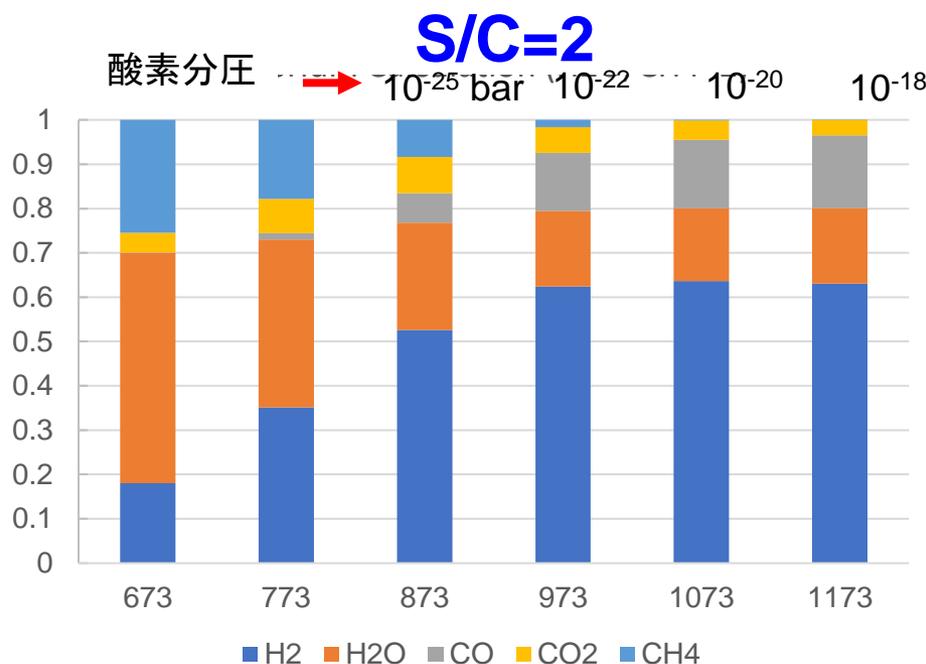


2. 産学官連携プロジェクト(耐久性PJ)

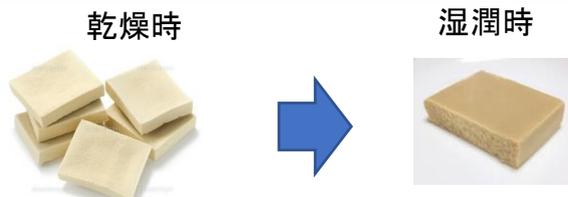
異なるS/Cでの平衡ガス組成：I-V-Uf変化で実験（高加湿と酸素導入）

都市ガス改質反応：
 $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = 6\text{H}_2 + \text{CO}$ Steam reforming
 $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{CO}_2$ Water gas shift

改質器を通った後の平衡ガス組成：
 700°C(973K)以上で、
 $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O} = 62\%/17\%$ (S/C=2)、 $56\%/27\%$ (S/C=3)



Ni-YSZサーメット支持体
 高燃料利用率でのイメージは高野豆腐？



目次

1. 序論：定置用燃料電池の普及とSOFC
2. SOFCの実用化と産学官連携プロジェクトの経緯
- 3. 評価・解析プロジェクトの成果概要(2020-02024年度)**
4. 今後の展開
5. まとめ

診断方法の開発

健康診断



検査項目:

- ・触診、・血液検査、・X線検査、
- ・エコー、・バリウム検査、・胃カメラ、...

劣化・寿命の予測法開発



病気の際の寿命予測:

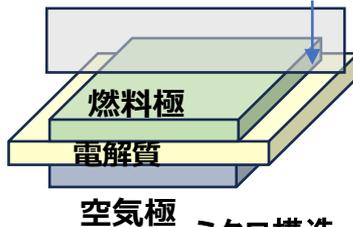
- ・がん細胞観察、・骨密度、・血中成分、...

SOFCセルスタック劣化分析(マイクロ～マクロ)

先進セルスタック電池性能分析：内部抵抗解析

- ・カレントインターラプション法
- ・交流インピーダンス法、DRT解析法

運転後のセル劣化分析(ナノ～ミクロン)



断面分析

- ・電極微構造 FIB-SEM
- ・電解質相変態 ラマン分光
- ・不純物蓄積 SIMS分析
- ・三相界面の長さの評価

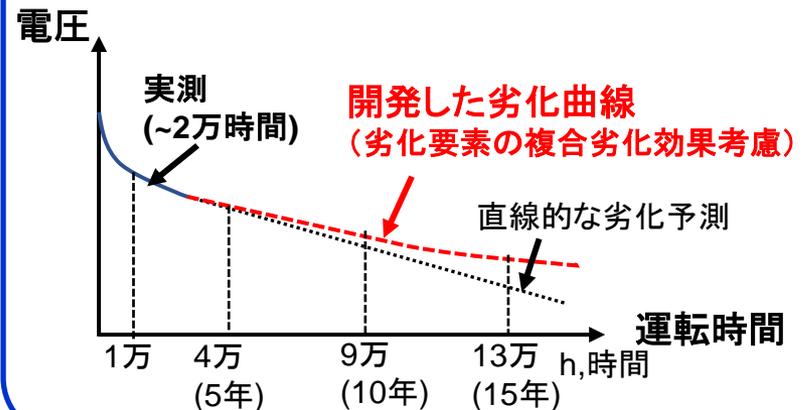
ミクロ構造：3次元解析

機械学習：画像解析、長時間後画像

SOFC劣化診断

スタックの長期寿命予測成果イメージ

- ・マイクロ～セルスタックレベルの劣化要因を考慮（マルチスケール）
- ・複数の劣化要因を考慮（複合劣化）
- ・15年後のスタック性能を予測（世界最長）



「固体酸化物形燃料電池スタックの高度評価・解析技術の研究開発」

概要

- ・固体酸化物形燃料電池(SOFC)の普及・適用性拡大に必要な、高度なスタック評価・解析技術の確立
- ・スタック13万時間超の長期寿命予測、65%LHV超効率、変動電力調整力応用負荷変動、急速起動
- ・スタック運用限界に近い状態を的確に評価し、長期寿命や運用性限界を予測する評価・解析技術を開発
- ・寿命予測や劣化診断ができる高度な評価技術を開発しSOFCの適用性拡大・本格普及を促進

本プロジェクトの3テーマ概要と連携・取組イメージ

(1)長寿命・高効率セルスタック評価技術開発

【電中研、産総研(京セラ、森村SOFC、デンソー(東邦ガス))】
 ・高効率スタック長期安定性の検証と評価法開発

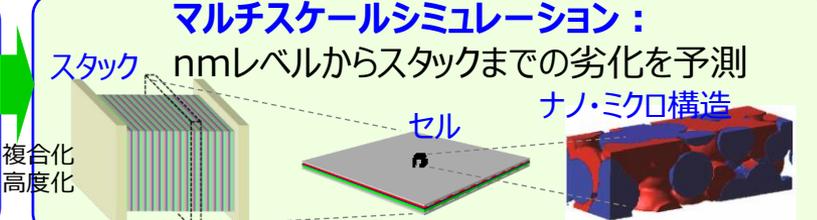
(3)先進評価技術開発

【電中研、産総研、東大(千葉工大)、京大、九大(東京ガス)、東北大(慶応大)】
 ・高度な新規評価(機械学習の応用)
 ・劣化要素を複合化したスタック評価・解析法を開発

(2)運用性拡大評価技術開発

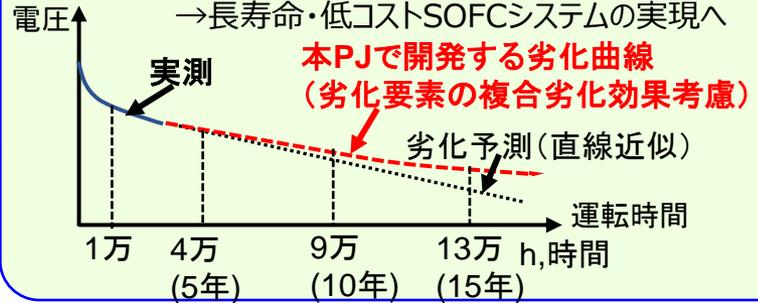
【電中研、東北大、イムラ・ジャパン、産総研(大阪ガスマーケティング、日産自動車、京セラ、森村SOFC、デンソー)】
 ・システム動特性、急速起動を可能とするセルスタックプロトコル、コンパクト化、などの運用性拡大評価技術の開発

既知の個別、部位ごとの劣化メカニズム、寿命予測
 新規評価法開発(機械学習による画像解析等)



SOFCスタックの長期寿命予測成果イメージ:

15年後のスタック性能を予測可能に(世界最長)
 →長寿命・低コストSOFCシステムの実現へ



3. 評価解析PJ:(1)研究開発の概要・目的

研究開発の背景・目的と実施意義

1) 事業の背景と目的：

- 固体酸化物形燃料電池(SOFC)システムは、家庭用が普及段階、業務・産業用が導入段階、**本格普及・産業競争力強化のためには、高効率・耐久などの性能向上が必要。**
- SOFCの本格普及には、**耐久**を現状10年→**15年(13万時間)**へ（電源設備で利用）
効率を現状55%→**効率65%以上**へ（分散電源で最高）
運用性向上→**負荷変動や起動停止**（メンテ性向上、再エネ連携、適用拡大）
- 上記の性能を満たす**長寿命・高効率SOFCスタックを的確・適正に評価できる方法・解析法は整備されておらず、先進的な評価・解析法を開発し、寿命予測法を開発することが目的**である。
評価・解析法を開発する中で、開発企業のセルスタック開発が同時に促進される。

2) 事業の意義・必要性：

- SOFC先進スタック(耐久年数15年(13万時間)、最高効率65%以上、負荷変動、急速起動などの運転可能)を的確に評価する方法はまだなく、**スタック開発企業が重要**としている。
- 先進スタックの評価・解析法ができることで、出荷前や長期運転時の性能の適正な評価や高性能システムの設計がしやすくなり、**生産性向上、適用性拡大・普及促進に寄与、3万台/年を拡大させる可能性。**
- 本事業を推進することで、SOFCシステムの性能評価技術向上、本格普及と適用性拡大に寄与
評価・解析法をほかのSO技術(プロトン伝導セル、リバーシブルセルや電解セルなど)にも適用して、
低炭素社会、脱炭素社会へとつながる重要な技術を提供（適宜システム企業とも意見交換）

3. 評価解析PJ:(1) 研究開発の概要 実施体制 (図解的体制図)

- 13万時間耐久・高効率スタックの評価技術・劣化診断法を確立するため、産学官連携体制構築
- 7委託機関、3スタック開発企業・3ユーザー企業(協力機関・共同実施)、2再委託先(2大学)
- 3つのテーマの評価技術開発が連携して、次世代スタック・システム開発に役立つ評価技術を開発

グループリーダー: 堀田照久(産総研)

会議頻度: 全体会議3か月ごと

① 長寿命・高効率セルスタック評価技術開発

- ア) 筒状平板形スタック耐久性評価
電中研、産総研(京セラ)
- イ) 中温平板形スタック耐久性評価
電中研、産総研(森村SOFCテクノロジー)
- ウ) 業務用平板形スタック耐久性評価
電中研、産総研(デンソー)



② 運用性拡大評価技術開発

- ア) システム動特性解析研究開発
電中研、産総研(京セラ、森村SOFCテクノロジー、デンソー)
- イ) 先進セルスタック評価プロトコル
イムラ・ジャパン、東北大、オブザーバー: 産総研(京セラ、森村SOFCテクノロジー、デンソー、日産自動車)
- ウ) コンパクト化のためのフィジビリティスタディ
東北大、産総研(大阪ガスマーケティング))

評価プラットフォーム: 企業セル分析と先端技術開発

③ 先進評価技術開発

- ア) スタック劣化評価解析
 - イ) 化学的信頼性評価解析
 - ウ) 機械的信頼性評価解析
 - エ) 電極微構造変化評価解析
 - オ) ミクロメゾ構造評価解析
 - カ) 局所構造評価解析
- 電中研 産総研 東北大(慶応大学) 東大(千葉工大) 京大 九大(東京ガス)
- スタック
セル
ミクロ
ナノ

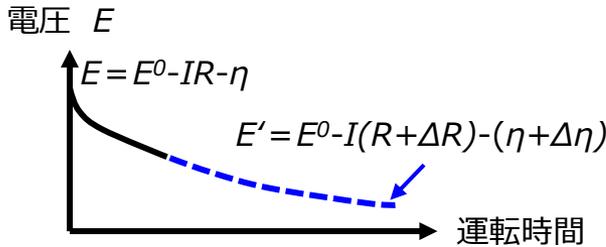
知財運営委員会
知財管理・データ管理、
審議、承認、成果発表
の審議、承認

連携
連携
連携
耐久サンプル
劣化要因分析
改良点示唆

最終目標

達成される成果

① 13万時間(15年)の耐久予測・加速劣化試験法・劣化診断法確立



② 運用性評価法プロトコル策定

- ・急速起動を適正に評価できるプロトコル
- ・システム動特性の評価法

③ 先進劣化評価法の確立

- ・AI機械学習の適用：
電極微構造変化予測、電気化学性能予測
- ・劣化評価法の高度化

解決アプローチ

マルチスケールシミュレーション

スタック性能表示式法の拡張

機械学習の応用

開発項目

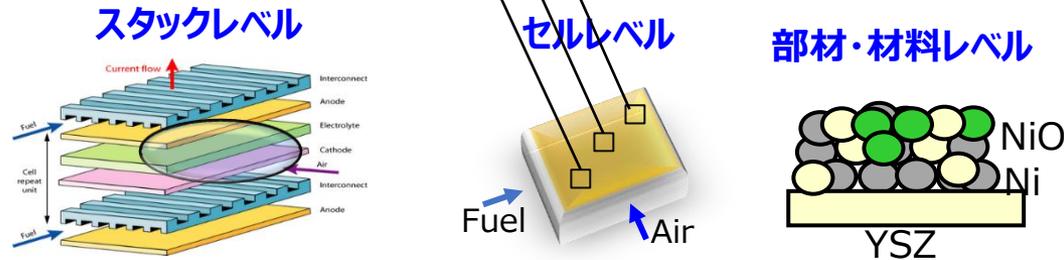
劣化評価法高度化

2万時間超スタック運転

電極微構造・電気化学データ

解明すべき要因と課題

各地点：拡散過電圧の交換電流密度低下：
 $i = i_0 \{ \exp(nf\eta) - \exp(-nf\eta) \}$ 劣化で i_0 減少



スタックレベル劣化要因：

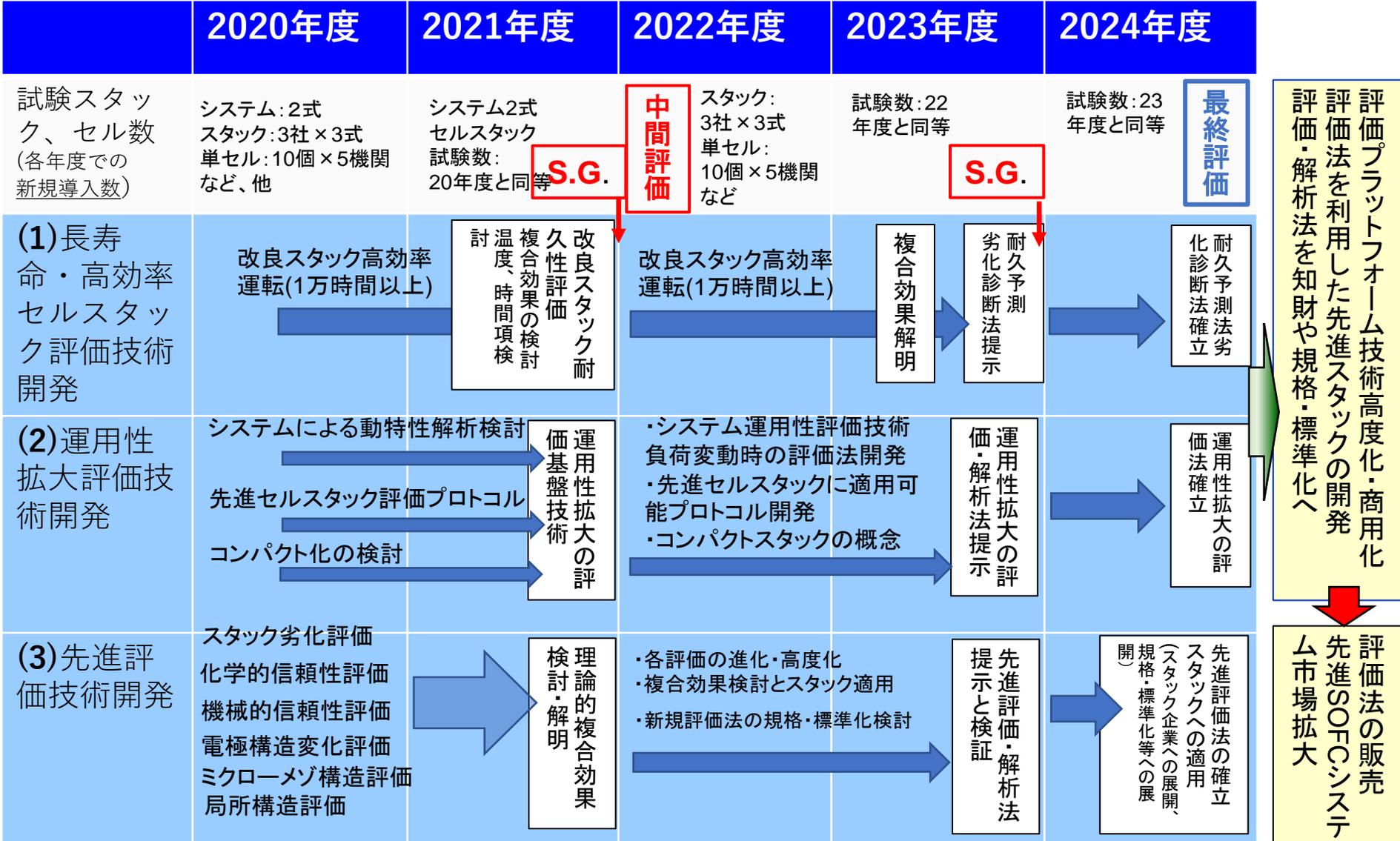
- (1) ガス・温度分布による不均一
- (2) 応力・変形による接触抵抗増
- (3) セル劣化の分布・複合効果

部材・セルレベル劣化要因：

- (1) 不純物による電極性能低下
- (2) 電極微構造変化(TPB減少)
- (3) 電解質相変態での電導度低下
- (4) SrZrO₃等高抵抗層生成
- (5) セル内温度、電流、応力分布

3.評価解析PJ: (3)研究開発の進捗・成果

研究開発スケジュール概要



S.G. ステージゲート、事業部が行う評価

3. 評価解析PJ: (3) 研究開発の進捗・成果

プロジェクト進捗: スタック高効率運転耐久評価と評価プラットフォーム取組

- 先進スタック長期試験 : 燃料利用率 $U_f = 85\%$ (効率65%以上) で2万時間の耐久試験達成
- 先進スタック劣化機構解明 : 大学・研究機関と連携して高 U_f での評価法開発とその劣化機構解明
- 判明劣化状況 : 高 U_f での燃料極過電圧増、IRと空気極が主要因、複合的な劣化機構を解明・提唱

スタック形状 (企業名)	劣化主要因 (抵抗増大因子) 最大運転時間	推定劣化現象	劣化時間依存性	評価プラットフォーム取組: メカニズム解明・複合化への取り組み	判明した高 U_f での劣化率 ・前PJとの相違
筒状平板形 (京セラ) 	<ul style="list-style-type: none"> ・IR抵抗 ・空気極過電圧 (通常運転と同じ) <p>$U_f = 80\%$ 20,000h $U_f = 85\%$ 20,000h (各2回実施)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・電解質電導度低下 ・空気極/電解質界面絶縁層生成 ・電極組成・微構造変化 ・酸化物ICの酸素リーク 	直線 + 1/2乗速 + 指数関数	<ul style="list-style-type: none"> ・高 U_f で燃料極微構造変化小(産総研) ・不純物蓄積Sは影響小(産総研) ・IC中の酸素透過量小(産総研) ・製造時セル欠陥検出法開発中(東北大) 	<p>$U_f = 80\%$ で0.32%/kh $U_f = 85\%$ で0.37%/kh 通常運転より劣化率上昇</p> <p>・高 U_f での燃料極過電圧上昇観測</p>
中温平板形 (森村SOFCテクノロジー) 	<ul style="list-style-type: none"> ・IR抵抗 ・空気極過電圧 (通常運転と同じ) <p>$U_f = 80\%$ 20,000 h $U_f = 85\%$ 20,000h</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・電解質電導度低下 ・空気極/電解質界面絶縁層生成 ・電極組成・微構造変化 ・金属ICの抵抗増大 ・温度分布、変形・シール 	直線 + 1/2乗速 + 指数関数	<ul style="list-style-type: none"> ・電極劣化評価: 燃料下流での燃料極活性点減少も一部あり(京大) ・ボタンセルDRT解析(京大) ・不純物蓄積:S、Si確認影響小(産総研) 	<p>$U_f = 80\%$ で0.28%/kh $U_f = 85\%$ で0.35%/kh 通常運転と同等レベル</p> <p>・高 U_f での燃料極過電圧上昇観測</p>
業務用平板形 (デンソー) 	<ul style="list-style-type: none"> ・IR抵抗 ・燃料極過電圧 <p>$U_f = 80\%$ 数1,000h $U_f = 85\%$</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・電解質電導度低下 ・電極/電解質界面絶縁層生成 ・電極組成・微構造変化 ・セルの変形・シール性 ・金属ICの抵抗増大 	直線 + 1/2乗速 + 指数関数	<ul style="list-style-type: none"> ・ボタンセル電極劣化評価: DRT解析(京大) ・応力機械的評価(東北大) ・燃料極の不純物分析、金属ICの酸化・抵抗増(九大) 	<p>$U_f = 80\%$ で0.63%/kh-数%/kh</p> <p>燃料極過電圧で劣化率増大</p>

世界最高レベル達成: 効率65%想定で2万時間以上のスタック試験、耐久確認
Confidential

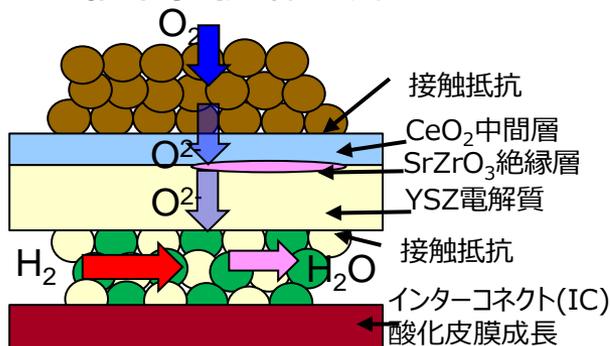
3.評価解析PJ: (3)研究開発の進捗・成果

高精度劣化分析：スタック劣化評価、複合劣化と連携 (産総研、東北大、東大、京大、九大)

- 高精度分析：オーミック抵抗と過電圧を分離、各部材の劣化を複合化した高度セルスタック分析
- スタック電圧の低下と過電圧抵抗成分の増大 : 作動電圧： $E = E^l - (i\Delta R(t) + \Delta\eta(t))$
- 過電圧増大を交換電流密度の低下で表示・予想： $i = i_0 \{ \exp(nf\eta) - \exp(-n)f\eta \}$

セルのオーム抵抗発生要因:

- 1) ジルコニア電解質の相変態
- 2) SrZrO₃絶縁層生成
- 3) セリア-ジルコニア固溶体生成
- 4) ICの酸化皮膜成長
- 5) 接触抵抗増大、他



抵抗成分発生部位	抵抗の性質	劣化要因	時間依存 (検討中)
電解質 (Y ₂ O ₃ -ZrO ₂ など)	オーミック	・立方晶→正方晶相変態 ・プロトンリーク効果他	抵抗半分になる時間が時間の指数関数
絶縁層生成 (SrZrO ₃ , Ce-Zr固溶体)	オーミック	・Sr拡散による高抵抗層 ・固溶体生成	拡散支配で時間の1/2乗
空気極	過電圧	不純物(S, Cr)被毒、組成変化、微構造変化、界面変化	拡散支配なら時間の1/2乗
燃料極	過電圧	不純物(S, P)被毒、Ni微構造変化、凝集等	拡散支配なら時間の1/2乗
インターコネクタ	オーミック	・金属表面被膜成長 ・酸化物IC中の酸素透過	・適切な皮膜で放物線測で成長 ・酸素透過はあるが、長時間後も少ない

世界初: 複数劣化要因を複合させて考慮、セルスタックレベル劣化まで検討

3. 評価解析PJ: (3) 研究開発の進捗・成果

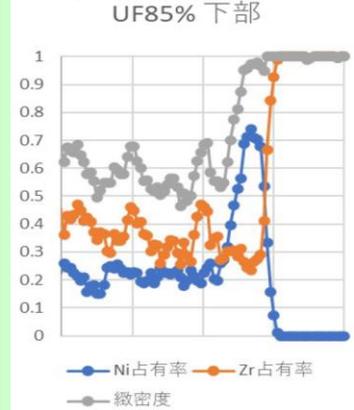
高精度劣化分析及び機械学習による画像解析法 (産総研、東大、東北大、京大他)

- 実スタック燃料極劣化：高燃料利用率(高Uf)及び通電下でのNi/YSZ燃料極におけるNiの移動
- Ni/YSZ燃料極微構造変化：モデルNi/YSZ界面での接触角評価、移動の評価
- 電解時接触角 > 燃料電池時接触角：電場と雰囲気との相互作用が影響、シミュレーションに反映

実スタックでの燃料極劣化観測

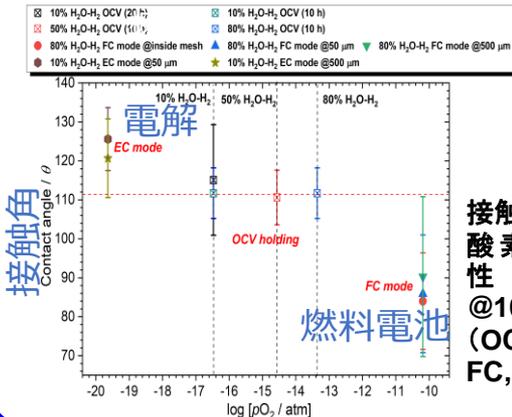
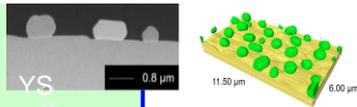
(産総研、電中研)

高Ufで過電圧増大: Niの移動・凝集観測



実スタックの高Uf長期運転でNi濃集挙動 → 高効率長期運転時の劣化に影響

Ni/酸化物界面の接触角評価(京大)

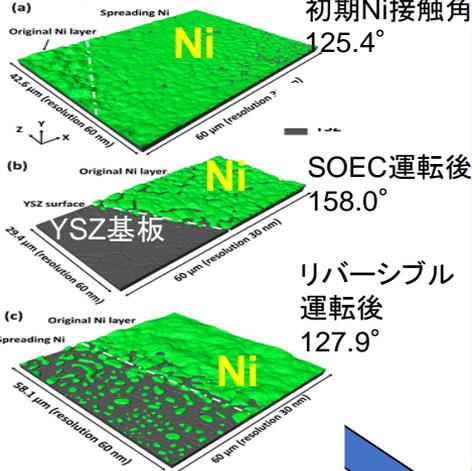


接触角の酸素分圧依存性 @1000 °C (OCV保持, FC, ECモード)

高精度分析法による劣化挙動の解明

レーザー顕微鏡の凹凸像

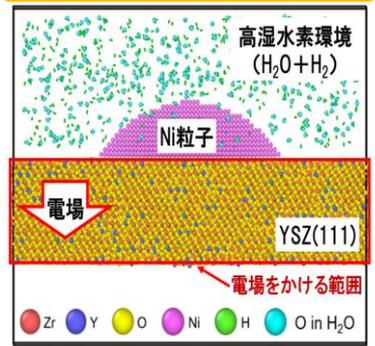
(東大)



分子動力学法の予測

(東北大)

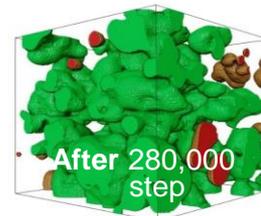
電場高湿水素下のNi粒子/YSZ(111)モデル



電場を考慮した分子動力学計算でYSZ表面上におけるNi粒子濡れ性向上

機械学習:電極3D像

(東大)



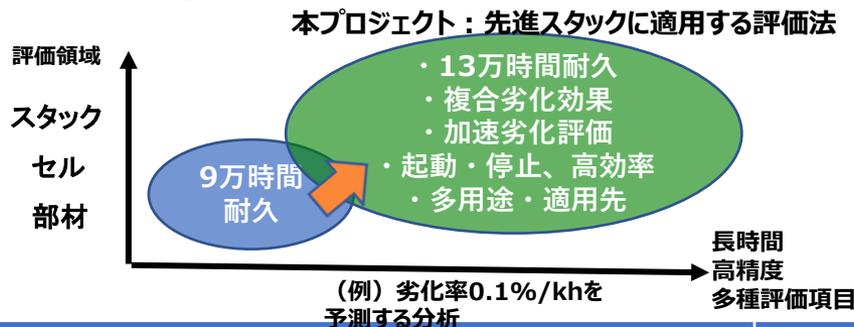
連結Ni
分断Ni

劣化要因・機構解明を複数分析法でおこない、実セルの劣化と対策を検討

新規評価法開発達成状況

評価法全体目標:

- ・スタック長時間耐久評価 (複合効果)
- ・劣化評価・診断法の高度化
- ・急速起動などの運用性評価
- ・機械学習などの高度評価技術



劣化評価・解析法	進捗・達成内容	達成度
1.セルスタックの複合劣化シミュレーション	<ul style="list-style-type: none"> ・劣化要素反応データの集積でスタックレベル劣化表現: IR、過電圧増大 ・信頼性デジタルツイン構築、代理モデルの適用 ・Fluent等商用ソフトへの適用 	80%
2.性能表示式法	<ul style="list-style-type: none"> ・Uf=85%で2万時間以上耐久運転の抵抗成分分離に適用可能、時間項追加で寿命予測可能に ・実データとの比較検証中 	80%
3.加速劣化試験法	<ul style="list-style-type: none"> ・矩形波変動で劣化の促進を確認。変動回数が耐久時間に相当するかの加速劣化相当量を検討 	80%
4.急速起動停止・負荷変動評価法	<ul style="list-style-type: none"> ・試験テスト装置完成、急速起動プロトコル構築中 ・スタックレベルの動特性モデル完成。システム化へ 	80%
5.革新評価・解析法	<ul style="list-style-type: none"> ・特徴の機械学習でセル表面欠陥検出可能に ・2次元画像からの3次元予測、酸化還元変化予測可能に今後数万時間後の電極微構造変化予測 	80%
6.高精度劣化分析法	<ul style="list-style-type: none"> ・雰囲気、電場などの効果を実験と3D解析で解明 ・微量不純物、伝導種の挙動解明: 長期劣化に対する影響解明 ・ボタンセル、モデル材の解析を実セル局所分布に適用 	80%

評価法が社会実装へ寄与

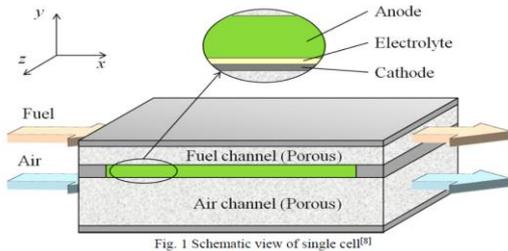
- 1) 寿命予測法 → 次世代セルスタック開発へ適用・促進
- 2) シミュレーション法 → 商用ソフトに組み込んで、広く性能予測や応力評価に適用
- 3) 個別革新評価法 → 知財化や企業との共同研究で性能向上に寄与

3.評価解析PJ: (3)研究開発の進捗・成果

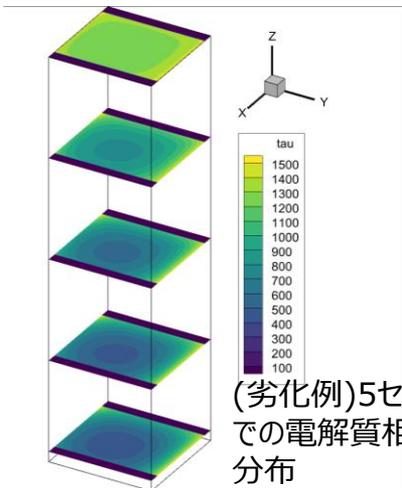
セルスタックの長期劣化シミュレーション: 複合劣化等を考慮 (京大ほか)

- 擬三次元SOFCスタックシミュレーションコード開発に成功 (担当: 京大、九大、産総研ほか)
- 複数の劣化要因を複合化・適用し、セルスタックの長時間運転劣化予測に成功
- 今後 実スタックの耐久データとの比較も行い、セルスタック企業にも提供、高耐久化に寄与予定

検討単セル



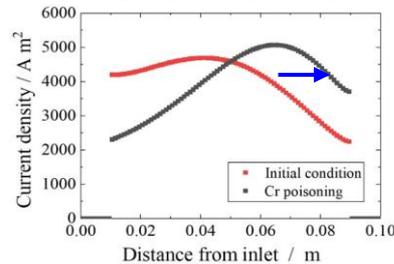
検討スタック



単セル評価: 劣化で電流密度のピークが下流へシフト

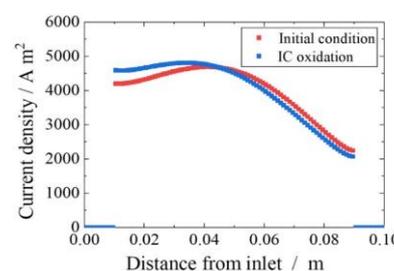
空気極劣化

反応電流密度分布変化



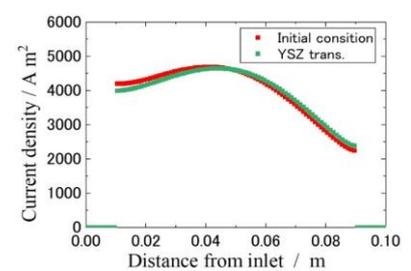
セパレータ酸化

反応電流密度分布変化

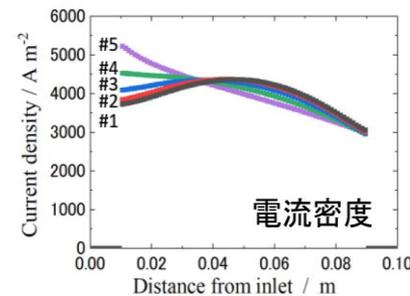
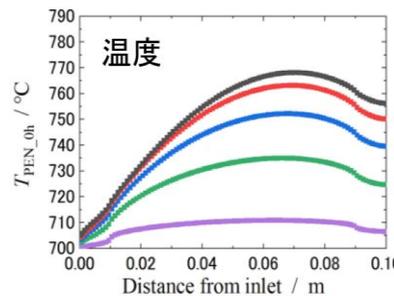


電解質相変態

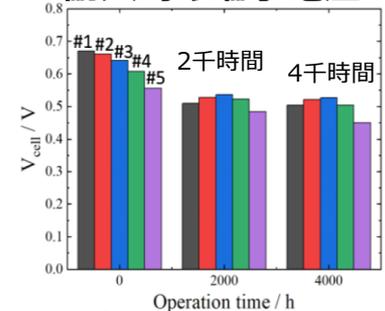
反応電流密度分布変化



5セルスタック評価: 複合劣化による温度、電流密度分布と電圧



耐久時の端子電圧



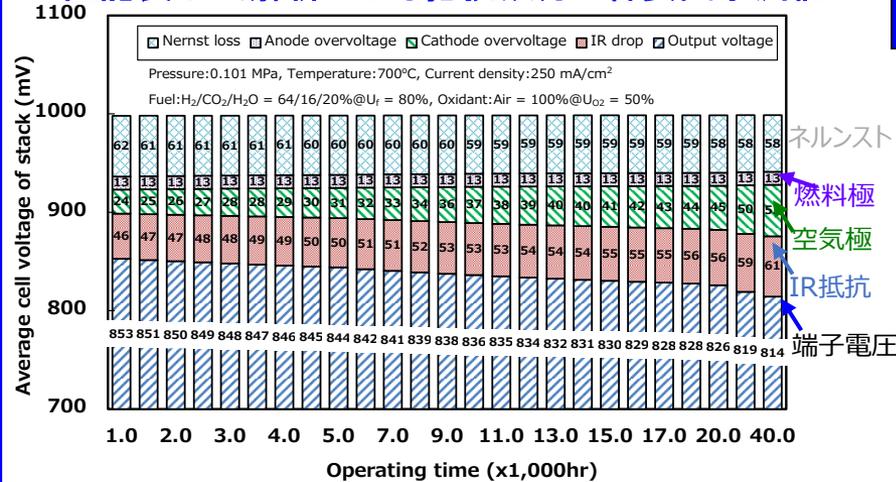
2千、4千時間後の各セルの予想端子電圧
ガス利用率、温度分布などを考慮して**劣化予測**

3.評価解析PJ: (3)研究開発の進捗・成果

性能表示式法:スタック抵抗分離と長期耐久予測 (電中研、京セラ、森村SOFC、デンソー他)

- 性能表示式による約2万時間までの解析結果を基に、部位毎の過電圧の性能劣化モデルを考慮した時間依存項を導入した近似式にて耐久予測に成功(電中研、京セラ、森村SOFC、デンソー他)
- 13万時間までのセル電圧を外挿し、高効率運転での劣化予測：10%/4万時間の劣化予測
- スタック予測法を各社の長期耐久予測法として適用：スタック寿命予測ができ生産コスト低減などに寄与

性能表示式解析による抵抗成分と各要因予測値



- 抵抗成分の分離と増大の時間依存性を検討
- 実測の2万時間で関数を構成

性能劣化モデルを複合化した劣化曲線

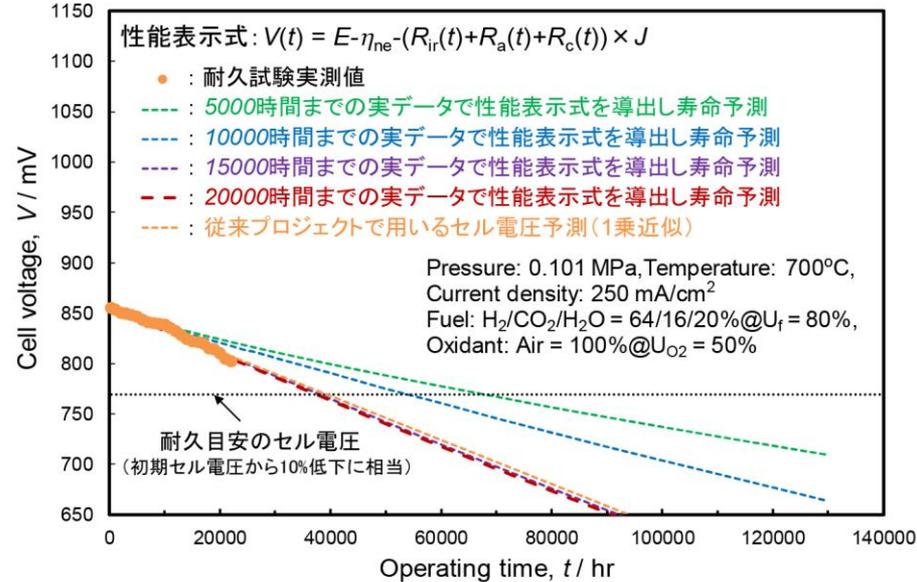


図 性能表示式の導入に用いた実データの時間数の違いによる予測されるセル電圧の時間依存性

性能表示式を用いて抵抗分離して得られた各過電圧に劣化現象の時間依存性を加味し、性能表示式に時間項を導入。各時間におけるセル電圧V(t)を求め、13万時間に外挿 (V:セル電圧、E:ネルンストの式より得られる開路電圧、η_{ne}:ネルンストロス、R_{ir}:内部抵抗、R_a:アノード反応抵抗、R_c:カソード反応抵抗、J:電流密度)

寿命予測検討:2万時間実測データからの13万時間予測

スタック加速劣化法の検討：矩形波による負荷変動（電中研ほか）

- 加速劣化法開発：負荷変動の繰り返しで、定格電流 J からの急峻な負荷上昇発生、セル面内での局所的に急激なストレス（電流集中、熱的集中、機械的応力集中）を与え、加速劣化とする
- $\Delta T=120s$ の間隔で負荷変動させると、通常に比べ電圧低下量が(16mV \rightarrow 26mV)増大し劣化加速
- 劣化加速法を標準化などに適用し、スタック開発会社の耐久予測・生産性向上に寄与

■ 加速劣化試験条件

スタック形式	筒状平板形 (京セラ)	中温平板形 (森村SOFCテクノロジー)	業務用平板形 (デンソー)
圧力 P	0.101MPa		
各社設定温度 T	750°C	700°C	700°C
燃料組成 酸化剤組成	H ₂ /CO ₂ /H ₂ O = 64/16/20% Air		
設定燃料利用率 U_f 下限/上限 $U_{f, low} / U_{f, high}$	U_f : 55/85% (Ave: 70%)	U_f : 55/85% (Ave: 70%)	U_f : 48/75% (Ave: 62%)
各社設定電流密度 J *1 下限/上限 J_{low} / J_{high}	0.36 A/cm ² J: 0.36/ 0.56 A/cm ²	0.37 A/cm ² J: 0.37/ 0.57 A/cm ²	0.40 A/cm ² J: 0.40/ 0.62 A/cm ²
変動周期 Δt	10~60 secをベースに各社と協議		
変動波形	<p> $J=1.55J_{rat}, U_f=85\%$ $J=1.27J_{rat}, U_f=70\%$ $J=1.00J_{rat}, U_f=55\%$ </p>		

*1: 負荷変動では、燃料流量一定下において燃料電池から取り出す電流のみを変動させる。この時、電流と燃料利用率は比例関係にある。

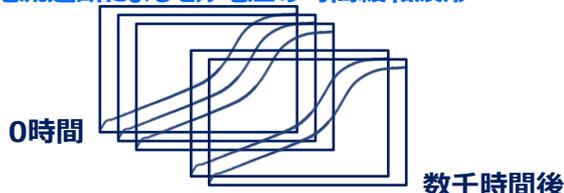
電流集中などによるセル面内の局所温度変動を想定した

機械学習による劣化挙動予測と連携して解析を進める

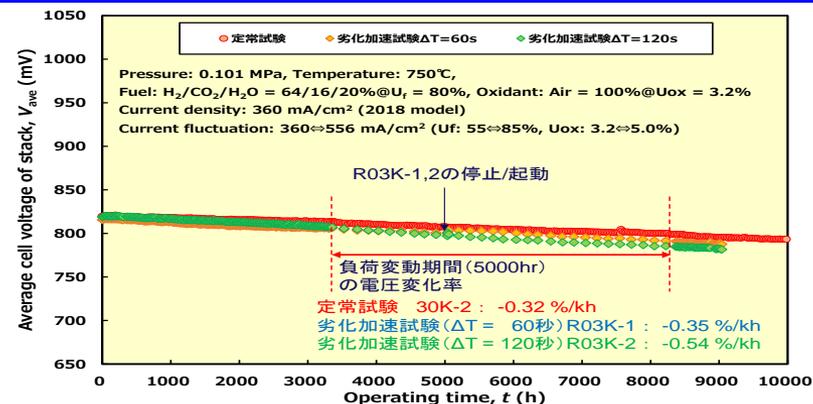
① 負荷変動中のセル電圧変化波形



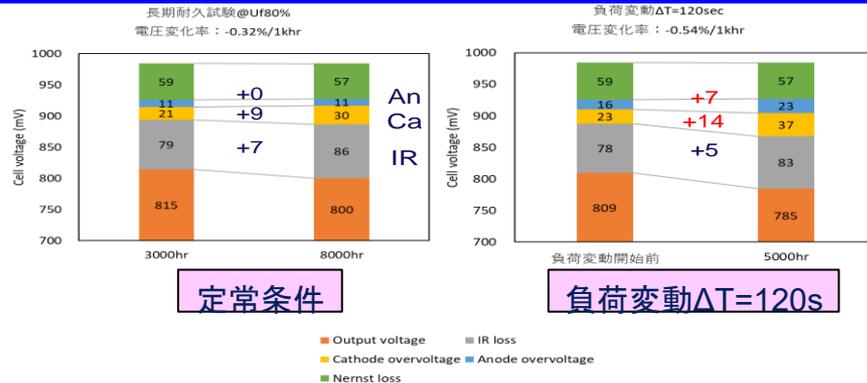
② 電流遮断によるセル電圧の時間緩和波形



① 負荷変動中のセル電圧変化波形や②電流遮断によるセル電圧の時間緩和波形を教師データとして機械学習によりセル性能劣化を予測する。



負荷変動試験によるセル電圧の変化比較（筒状平板形スタック）
（負荷変動試験中に定常条件にてセル電圧を測定し、電圧変化率を求めた）



5千時間負荷変動試験前後における劣化分析結果

● 矩形波の加速試験法の物理的・化学的な有効性について、検証中

スタック急速起動プロトコル構築：模擬試料・過酷試験装置開発 (イムラ・ジャパン、東北大)

- 急速起動・停止評価法の開発：SOFCスタックの運用性を格段に向上させる
- 評価法をスタック開発企業が用いて、その運用性が向上し、市場拡大に寄与する可能性大

急速起動・停止を想定した耐久性評価プロトコル策定に向けたスキーム

シミュレーション【東北大】

実機評価【イムラ・ジャパン】

起動時間30分の効果：

- ・エネファーム等のメンテ時間短縮
- ・強靱なセルスタック設計
- ・モビリティへの展開

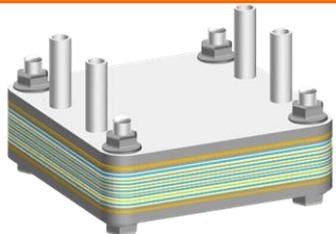
アウトカム

- ・SOFCシステムの家庭用・業務用での運用性向上
- ・適用性拡大による新規市場開拓

- ・燃料電池市場拡大
- ・脱炭素につながる分散電源

① モデル構築・検証

数値解析 ⇔ 実測データ



模擬スタックモデル(5セル)

②

拡張

想定スタックモデル(35セル)



模擬スタック
(温度測定コネクタ未実装)

<試験条件>

- ・パラメータ：熱媒(空気)温度、流量
- ・計測データ：セル温度(面内9点×5セル)、スタック表面温度(エンドプレート) 他

過酷試験装置【東北大】

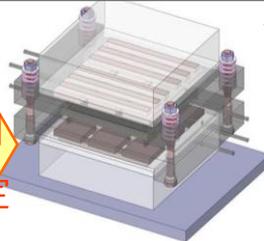
セル熱負荷任意に制御

急速起動・停止の
耐久性評価プロトコル

種々セルの
実態把握・課題明確化

起動：昇温 21℃/分
停止：降温 14℃/分

急速起動・停止時の
セル面内温度分布・勾配予測
⇒ ③評価プロトコル仮設定



セル製造工程での欠陥自動判別法及び関連技術の高度化 (東北大・京セラ)

- 人の目視では判断できない表面欠陥の検出高度化に成功
- 欠品などの高度な判別が可能：開発企業での生産性向上、低コスト化に貢献
- 新しいピンホール判別法も開発：ミクロンレベル以下のピンホール検出により、生産性の向上に寄与

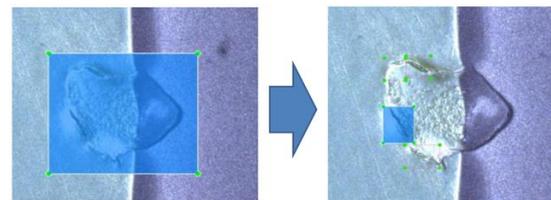
課題

R3年度後半
～追加課題



進捗

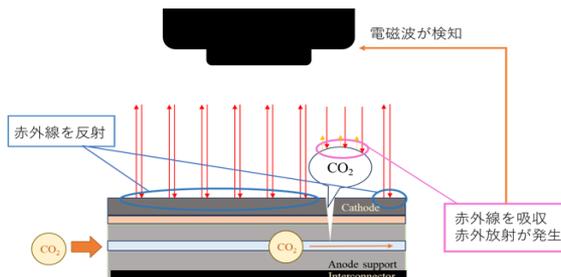
- 画像取得装置を試作
- 機械学習プログラムを作成
- 京セラと共同で学習用画像データを取得
- 検証用画像データにより判定精度を解析



=> 判定精度の向上のためのデータ取得・解析方法の最適化 => 実装へ

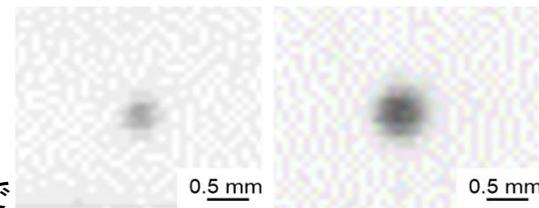
展開

各種電磁波 (THz, IR) によるピンホール欠陥の高感度可視化



機械加工による
人工ピンホール導
入

CO₂ガスを活用することで
高感度にピンホールを検
出できる(THz波)



CO₂ガスなし

CO₂ガスあり

3.評価解析PJ: (3)研究開発の進捗・成果

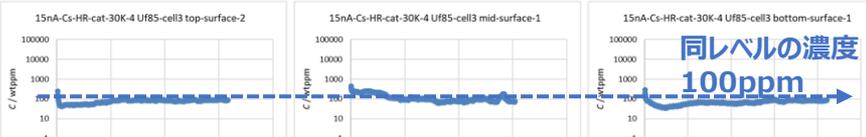
高精度劣化分析：微量不純物の電極への被毒機構解明（産総研 他）

- 先進スタックの解体分析：空気極に蓄積した不純物量評価にSIMSを適用(ppmレベル分析)、改良へ
- 劣化の主たる要因は空気極の抵抗増大：不純物分析で三相界面での硫黄(S)濃度増大を観測
- 微量不純物の影響・わずかな微構造変化解析が必要：分析・検出方法のさらなる高精度化必要
(例：放射光分析による電子状態解析や新規分析技術の開拓)

筒状平板形スタック 空気極中 S濃度分析 Uf=85%

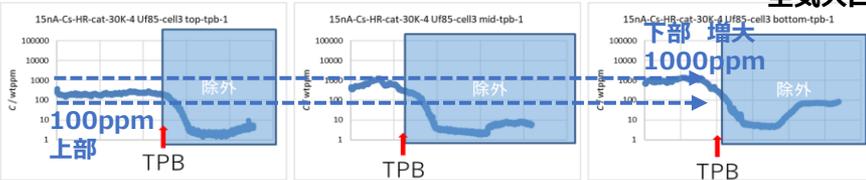
SIMS深さ方向分析プロファイル:表面、硫黄(S)

セル上部 表面 セル中央部 表面 セル下部 表面 空気入口



SIMS深さ方向分析プロファイル:TPB近傍、硫黄(S)

セル上部 TPB近傍 セル中央部 TPB近傍 セル下部 TPB近傍 空気入口



- セル下部(空気入口)での空気極/電解質界面(三相界面TPB) 近傍で硫黄(S)濃度増大
- 燃料利用率に関係なく濃度レベルは類似：空気極の劣化要因(SrSO_4 生成、微構造変化)
- 劣化解析をシミュレーションに反映



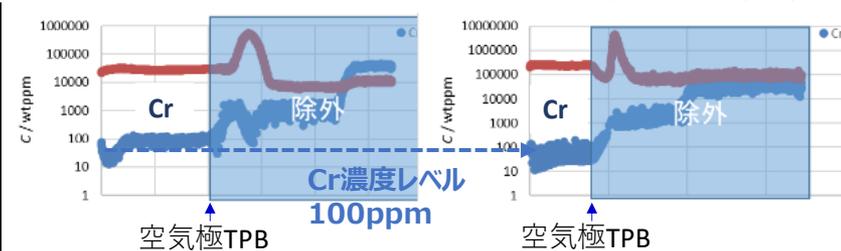
中温平板形スタック (旧型) 空気極中 Cr濃度分析 Uf=80%

中温平板形 (森村SOFC)

SIMS深さ方向分析プロファイル:Cr

旧型スタック外観 初期セル

1.8万時間後 耐久セル (Ain)



新型スタック外観

2021年度より
新型スタックの
評価へ

- Cr濃度が耐久後も変化なく、被毒耐性改善を確認。別分析でS濃度も初期レベルに抑えられていることを確認
- 上記の改善をして、新型セルスタックの構築へ：高性能なセルスタックの構築へ
- 劣化解析をシミュレーションに反映

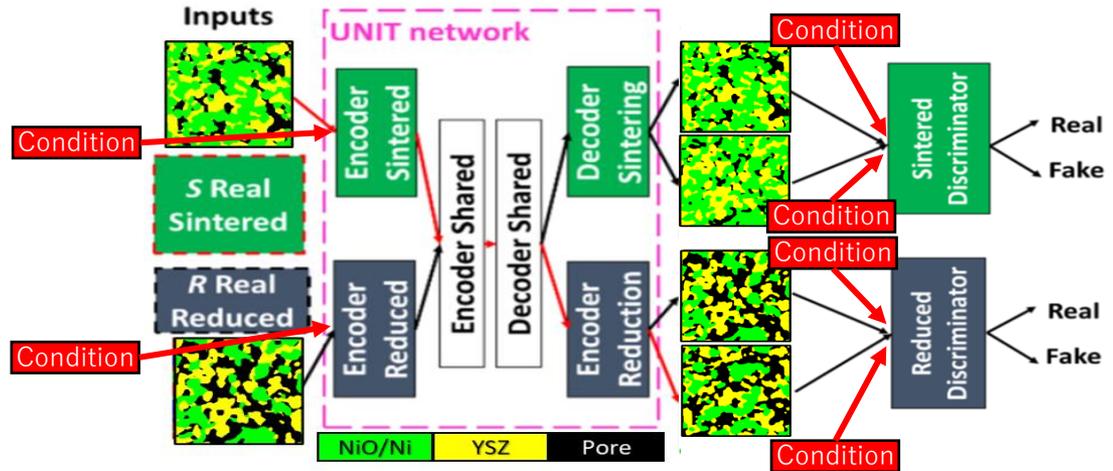
3.評価解析PJ: (3)研究開発の進捗・成果

機械学習の劣化解析への適用

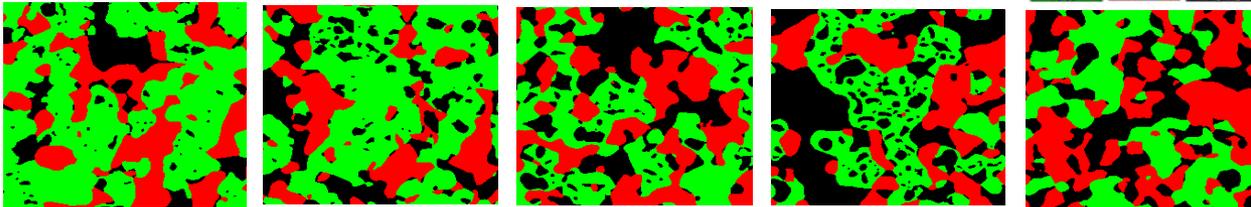
東京大学 (再委託: 千葉工大)

- 画像認識AI機械学習によりNiO-YSZ電極微構造の還元を再現することに成功
- 燃料極劣化予測のために、時間の関数を取り入れた手法を検討し、Ni分率変化を再現成功

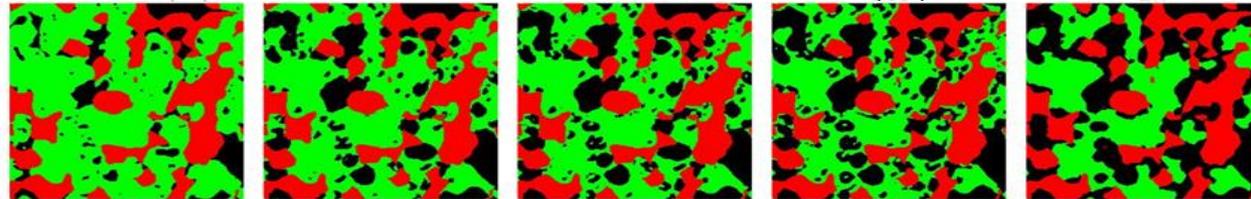
- 条件付きUnsupervised image-to-image translation (**C-UNIT**) によるNiO-YSZ還元反応の構造予測
- UNITは同一サンプルでない教師データであっても、教育が可能
- 時間も条件とすることで、劣化予測(時間変化)も予測



教師データ(それぞれ異なるサンプルの実験から取得)



C-UNITによる予測(同一サンプルでの時間変化. YSZ(赤)は不動)



初期NiO-YSZ

還元5秒後

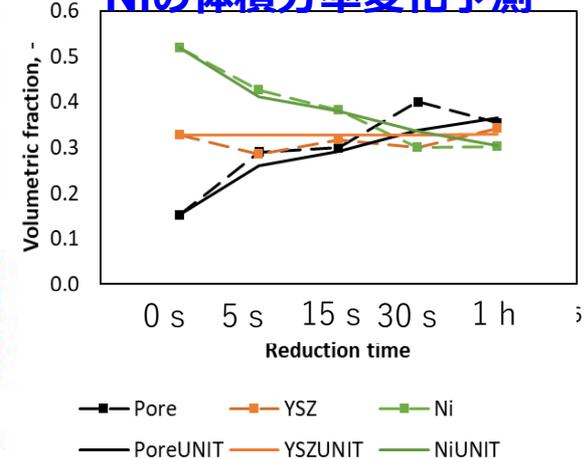
還元15秒後

還元30秒後

還元1時間後

電極微構造の画像予測及びそれによる劣化予測に目途をつけた

Niの体積分率変化予測



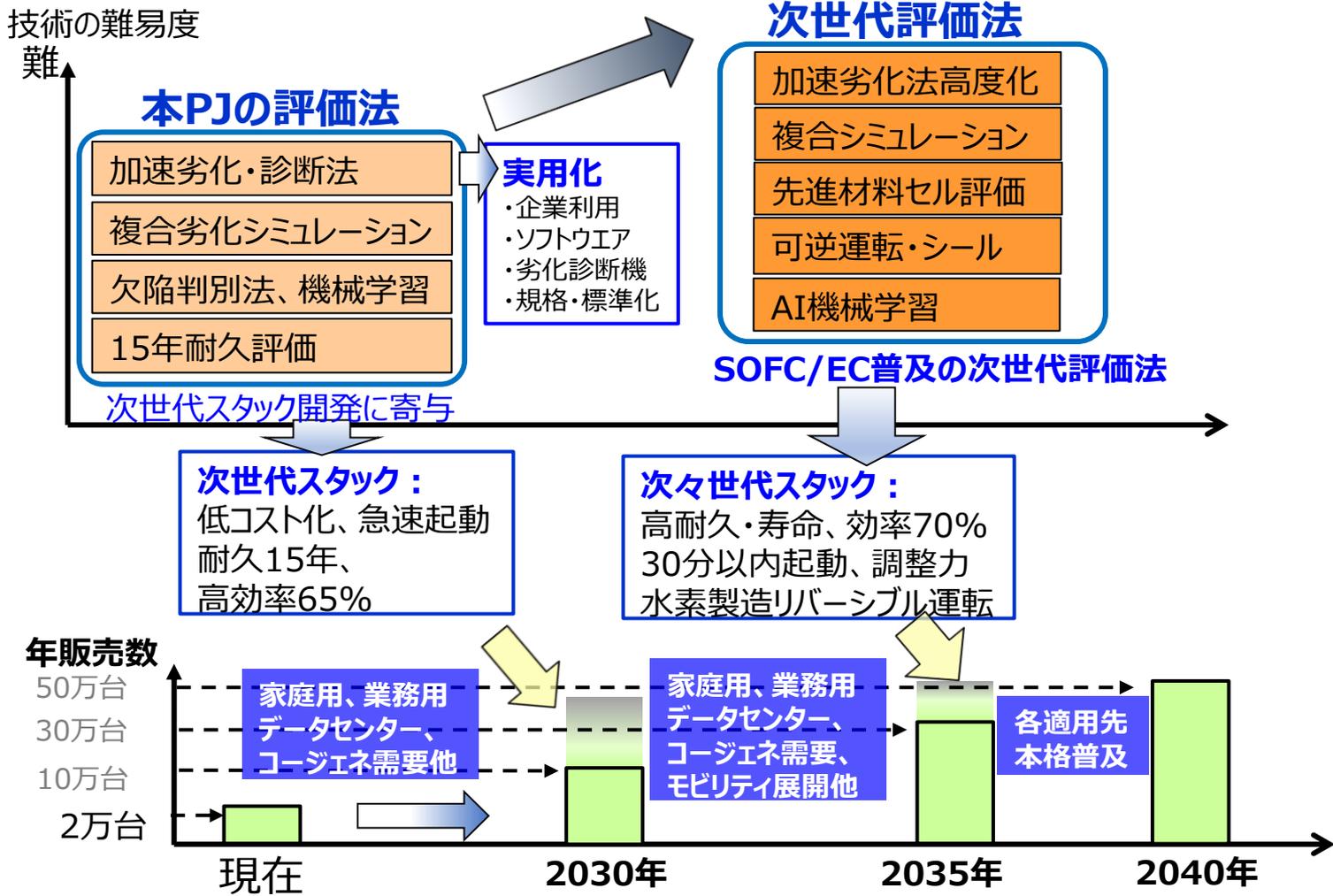
目次

1. 序論：定置用燃料電池の普及とSOFC
2. SOFCの実用化と産学官連携プロジェクトの経緯
3. 評価・解析プロジェクトの成果概要(2020-02024年度)
4. 今後の展開
5. まとめ

4. 今後の展開

実用化に向けた取り組み

- 開発した評価・解析法の実用化・標準化・高度化を進めることで、さらなる性能向上に寄与
- 開発した評価法を適用して、次世代スタックの開発が進展、高性能化、本格普及に寄与



開発評価法・解析法が次世代セルスタックに搭載されて、2025年実証、2030年までに実用化へ

5. まとめ

(1) SOFCシステムの商用化:

- ・年産2万台以上のエネファーム、本格普及に期待
- ・今後の業務・産業用普及とカーボンニュートラルに向けての貢献

(2) SOFCスタックの13万時間(15年)耐久を予測する高度な評価法を開発:

- ・マルチスケール(擬三次元)シミュレーション法の開発
- ・代理モデルの応用と商用ソフト(ANSYS Fluent)への組み込み
- ・先進的な性能表示式(時間項追加)の開発
- ・加速劣化試験法の開発

(3) SOFCスタックの適用性を広げる評価法を開発:

- ・30分で急速起動するスタック評価のためのプロトコル
- ・出力変動の急速化に対応するための評価法

謝辞：本研究開発は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務「燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業」（JPNP20003）のうち、「固体酸化物形燃料電池スタックの高度評価・解析技術の研究開発」の結果得られたものです。

ご清聴ありがとうございました